

**ANALISIS ARUS *INRUSH* AKIBAT *SWITCHING* KAPASITOR BANK  
DI GARDU INDUK SRAGEN**



**Disusun sebagai salah satu syarat menyelesaikan Program Studi Strata I  
pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik**

**Oleh :**

**DONI FREBIANDI**

**D400140113**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SURAKARTA**

**2018**

**HALAMAN PERSETUJUAN**

**ANALISIS ARUS *INRUSH* AKIBAT *SWITCHING* KAPASITOR BANK  
DI GARDU INDUK SRAGEN**

**PUBLIKASI ILMIAH**

D400140113

oleh:

**DONI FREBIANDI**

**D400140113**

Telah diperiksa dan disetujui untuk diuji oleh:

Dosen Pembimbing



**Agus Supardi, S.T., M.T.**

**NIK.883**

**HALAMAN PENGESAHAN**  
**ANALISIS ARUS *INRUSH* AKIBAT *SWITCHING* KAPASITOR BANK**  
**DI GARDU INDUK SRAGEN**

OLEH  
**DONI FREBIANDI**  
D400140113


Telah dipertahankan di depan Dewan Penguji  
Fakultas Teknik Elektro  
Universitas Muhammadiyah Surakarta  
Pada hari Kamis, 26 Juli 2018  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Dewan Penguji:

1. Agus Supardi, S.T., M.T.  
(Ketua Dewan Penguji)
2. Aris Budiman, S.T., M.T.  
(Anggota I Dewan Penguji)
3. Hasyim Asy'ari, S.T., M.T.  
(Anggota II Dewan Penguji)

(.....)  
(.....)  
(.....)

Dekan,

  
**Ir. Sri Sunarjono, M.T., Ph.D.**  
NIK. 682

## PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam naskah publikasi ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Apabila kelak terbukti ada ketidakbenaran dalam pernyataan saya di atas, maka akan saya pertanggungjawabkan sepenuhnya.

Surakarta, 26 Juli 2018

Penulis



DONI FREBIANDI

D400140113

# ANALISIS ARUS *INRUSH* AKIBAT *SWITCHING* KAPASITOR BANK DI GARDU INDUK SRAGEN

## Abstrak

Gardu Induk Sragen menetapkan faktor daya sebesar 0,9. Untuk mencapai faktor daya yang ditetapkan tersebut yaitu dengan menggunakan kapasitor bank sebagai kompensator daya reaktif. Apabila kapasitor bank disusun secara paralel pada bus akan menyebabkan suatu masalah fenomena *transient* yaitu arus *inrush*. Hal tersebut dapat menyebabkan kerusakan pada sistem dan membuat kapasitor bank tidak bertahan lama. Metode yang digunakan perhitungan dengan data yang diperoleh berdasarkan jurnal dan literatur terkait. Setelah pengumpulan referensi selanjutnya adalah pengambilan data-data yang didapatkan di Gardu Induk Sragen. Tahapan berikutnya dengan menghitung nilai induktansi rangkaian dan besar nilai arus *inrush* akibat *switching* kapasitor bank. Setelah menghitung dan dianalisa menggunakan standart ANSI/IEEE C37.012-2005 ternyata nilai arus *inrush* di Gardu Induk Sragen melebihi 100 kali arus rms. Nilai arus *inrush* yang di luar batas tersebut harus diredam dengan menggunakan reaktor seri. Setelah menggunakan reaktor seri ternyata hanya kondisi step 1 saja yang bisa direduksi arus *inrush*nya sedangkan untuk kondisi kedua belum bisa. Untuk mereduksi arus *inrush* step kedua harus penambahan reaktor seri lebih dari 6% tapi tidak sesuai dengan standart ANSI/IEEE C37.012-2005.

**Kata kunci :** Faktor daya, *switching*, kapasitor bank, arus *inrush*, *transient*

## Abstract

Sragen Substation provides a power factor of 0.9. To achieve the defined power factor is to use the bank capacitor as a reactive power compensator. If the bank capacitor is arranged in a parallel on the bus it will cause a transient phenomenon of inrush current. This can cause damage to the system and make the bank capacitor not last long. The method used to calculate the data obtained by journal and related literature. After collecting the next reference is the retrieval of data obtained in Sragen Substation. The next step by calculating the value of circuit inductance and the value of inrush current due to switching capacitor bank. After calculating and analyzed using ANSI / IEEE C37.012-2005 standard, the inrush current value in Sragen Substation exceeds 100 times rms current. Inrush current values outside the boundary shall be muffled by using series reactors. After using the series reactor was only a step 1 condition that can be reduced inrush but current while for the second condition can not. To reduce the second inrush step the addition of series reactor should be more than 6% but not in accordance with the standard ANSI / IEEE C37.012-2005

**Keyword :** Power factor, switching, capacitor bank, inrush current, transient

## 1. PENDAHULUAN

Daya reaktif adalah sebuah kebutuhan yang sangat diperlukan untuk peralatan listrik yang bersifat induktif. Kebutuhan daya reaktif gardu induk harus ditunjang oleh kapasitor bank untuk memenuhi kekurangan daya listrik atau memperbaiki faktor daya, dengan ini dapat meningkatkan efisiensi sistem tenaga listrik dan meningkatkan stabilitas (Chandra, 2014).



Koreksi faktor daya adalah istilah yang diberikan untuk teknologi yang telah digunakan sejak pergantian abad ke-20. Ini biasanya dicapai dengan penambahan kapasitor ke jaringan listrik yang mengimbangi permintaan daya reaktif dari beban induktif dan dengan demikian mengurangi beban pada pasokan. Seharusnya tidak ada efek pada pengoperasian peralatan. Jika faktor daya dari pembangkit listrik rendah maka akan menggunakan lebih banyak daya dari pada yang dibutuhkan untuk melakukan pekerjaan. Faktor daya yang buruk harus diperbaiki karena secara substansial meningkatkan biaya. Kapasitor umumnya adalah cara paling ekonomis untuk meningkatkan faktor daya (Marlar, 2008).

Gardu Induk Sragen mempunyai 3 kapasitor bank masing-masing mempunyai kapasitas 8,3 MVar sehingga total kapasitas kapasitor bank sebesar 25 MVar pada tegangan 150 kV. Penggunaan kapasitor bank secara bertahap sesuai dengan kebutuhan daya reaktif pada sistem, terlebih dalam keadaan beban puncak. Penggunaan kapasitor bank dapat menyebabkan fenomena *transient* yaitu arus *inrush* yang besar saat melakukan proses *switching* kapasitor bank. Operasi *switching* saklar pada suatu rangkaian listrik dapat mengakibatkan terjadinya lonjakan tegangan dan arus yang tinggi (Ramasamy, 2005). Fenomena *transient* adalah perubahan arus yang tinggi atau laju perubahan arus awal yang tinggi dalam jangka waktu tertentu (Das, 2010). Penyebabnya adalah dari faktor eksternal atau lingkungan misalnya petir dan dapat juga akibat perlakuan dari sistem itu sendiri atau faktor internal seperti proses *switching*.

Arus *inrush* yang tinggi dapat menyebabkan *dips* dan *tripping* relay arus diferensial, kedua hal tersebut dapat menyebabkan penurunan kualitas daya (Chiesa, 2010). Arus *inrush* bisa didefinisikan besarnya atau kenaikan arus yang pertama kali muncul pada rangkaian, saat rangkaian terhubung dengan suatu beban (Mohamad, 2014). Arus *inrush* yang melebihi batas ditentukan dapat menyebabkan kerusakan pada sistem dan membuat kapasitor bank tidak bertahan lama. Batas arus *inrush* yang ditentukan menurut IEEE adalah sebesar 100 kali dari arus rms (Steve, 2005).

## **2. METODE**

### **2.1 Rancangan Penelitian**

#### **1) Studi literatur**

Penulis melakukan studi literatur yaitu dengan mencari jurnal- jurnal atau buku yang dijadikan referensi dalam menyelesaikan dan mendukung penelitian terkait dengan “Analisis Arus *Inrush* Akibat *Switching* Kapasitor Bank di Gardu Induk Sragen”.

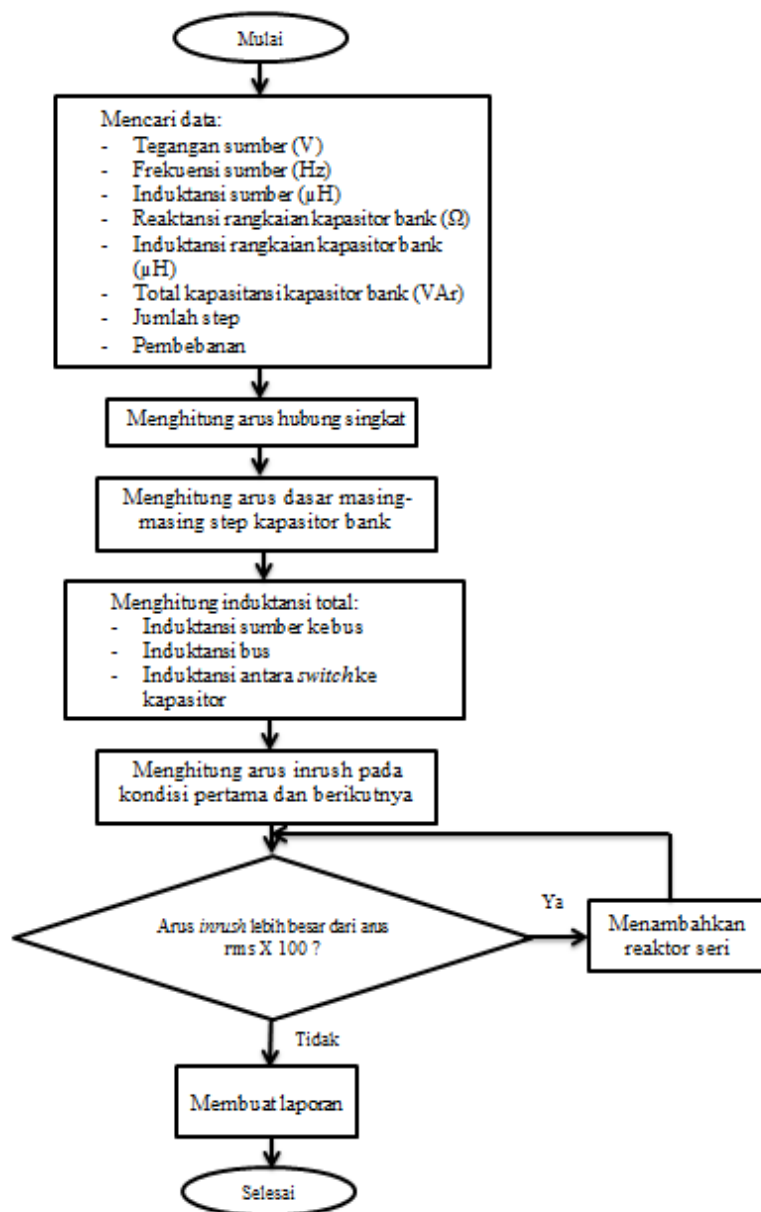
#### **2) Pengumpulan data**

Penulis melakukan pengumpulan data di Gardu Induk Sragen yang selanjutnya akan diolah. Data yang dibutuhkan adalah:

- 1) Data tegangan sumber.
  - 2) Data frekuensi sumber.
  - 3) Data total kapasitas kapasitor bank.
  - 4) Data tegangan nominal kapasitor.
  - 5) Data jumlah step.
  - 6) Data hubungan kapasitor bank.
  - 7) Data pembebanan.
- 3) Analisis data

Penulis melakukan analisis dari data yang sudah diperoleh di Gardu Induk Sragen.

## 2.2 Flowchart Penelitian

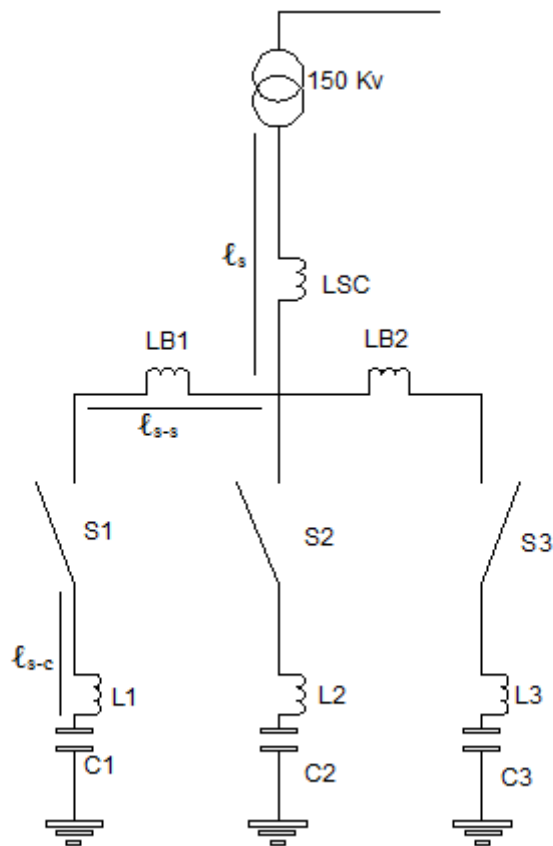


Gambar 1. Flowchart penelitian

### 2.3 Data

Untuk menghitung nilai besarnya arus inrush dan frekuensi akibat switching kapasitor bank di Gardu Induk Sragen dibutuhkan data-data sebagai berikut:

- 1) Tegangan sumber : 150 kV
- 2) Frekuensi sumber : 50 Hz
- 3) Kapasitas total kapaitor bank : 25 MVA<sub>r</sub>
- 4) Jumlah step : 3 Step
- 5) Panjang ( $\ell_s$ ) antara bus dengan sumber sebesar : 70 m
- 6) Panjang ( $\ell_{s-s}$ ) antara *switch* pada kapasitor bank 1 dengan *switch* pada kapasitor bank 2 sebesar : 4,1 m
- 7) Panjang ( $\ell_{s-c}$ ) antara *switch* dengan kapasitor bank sebesar : 2,5 m



Gambar 2. Konfigurasi rangkaian kapasitor bank di Gardu Induk Sragen

Tabel 1. Kebutuhan beban di Gardu Induk Sragen

Jam (WIB)	Beban (MW)	Faktor daya
07.00	18	0,77



08.00	21	0,78
09.00	21	0,77
10.00	20	0,78
11.00	22	0,79
12.00	21	0,77
13.00	24	0,79
14.00	20	0,80
15.00	21	0,80
16.00	22	0,75
17.00	23	0,76
18.00	27	0,76
19.00	29	0,76
20.00	24	0,75
21.00	22	0,75
22.00	21	0,76

Tabel 1 menunjukkan kebutuhan beban di Gardu Induk Sragen dari jam 07:00 WIB s/d jam 22:00 WIB. Pada jam 19.00 WIB merupakan beban yang terbesar sebesar 29 MW dan pada jam 07.00 WIB merupakan beban yang terendah sebesar 18 MW. Faktor daya beban di Gardu Induk Sragen tidak sesuai dengan standart PLN yang seharusnya 0,90.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Pembebanan Sistem Tenaga Listrik di Gardu Induk Sragen

Kapasitor bank di Gardu Induk Sragen bekerja secara otomatis dan bertahap/step oleh sistem sesuai dengan kebutuhan beban setiap harinya dan untuk memperbaiki faktor daya. Dapat dihitung besarnya nilai daya reaktif (VAr) per jam dan berapa kapasitor yang bekerja untuk memenuhi kebutuhan daya reaktifnya (VAr). Misalnya diambil contoh 1 perhitungan untuk menentukan nilai daya reaktif (VAr) pada jam 16:00 WIB. Diketahui:

Beban : 22 MW

Sebelum melakukan perhitungan daya reaktif dicari dulu sudutnya ( $\phi$ ) dengan cara sebagai berikut:

Faktor daya 1 :  $\cos \phi_1 = 0,75 \Rightarrow \phi_1 = \cos^{-1}(0,75) = 41,40^0$  (Sebelum diperbaiki)

Faktor daya 2 :  $\cos \phi_2 = 0,90 \Rightarrow \phi_2 = \cos^{-1}(0,90) = 25,84^0$  (Standart)

Jadi nilai daya reaktif (VAr) yang dibutuhkan pada jam 16:00 WIB dapat dihitung:

$$Q = P (\tan \phi_1 - \tan \phi_2) \dots\dots\dots(1)$$

$$= 22 \text{ MW } (\tan(41,40^0) - \tan(25,84^0)) = 22 \text{ MW } (0,88 - 0,48) = 8,71 \text{ MVar}$$

Dengan:

Q : Daya reaktif (MVar)

P : Beban (MW)

$\phi_1$  : Nilai sudut sebelum diperbaiki

$\phi_2$  : Nilai sudut standart PLN

Jadi nilai daya reaktif (VAr) pada jam 16.00 WIB sebesar 8,71 MVar maka kapasitor yang berkerja sebanyak 2 kapasitor atau dengan menggunakan 2 step sebesar 16,6 MVar karena setiap stepnya mempunyai kapasitas 8,3 MVar.

Tabel 2. Kebutuhan daya reaktif di Gardu Induk Sragen

Jam (WIB)	Faktor daya 1	Faktor daya 2	Beban (MW)	Daya reaktif (MVar)	Step
07.00	0,77	0,90	18	6,19	1
08.00	0,78	0,90	21	6,67	1
09.00	0,77	0,90	21	7,22	1
10.00	0,78	0,90	20	6,36	1
11.00	0,79	0,90	22	6,40	1
12.00	0,77	0,90	21	7,22	1
13.00	0,79	0,90	24	6,98	1
14.00	0,80	0,90	20	5,30	1
15.00	0,80	0,90	21	5,56	1
16.00	0,75	0,90	22	8,71	2
17.00	0,76	0,90	23	8,51	2
18.00	0,76	0,90	27	9,99	2
19.00	0,76	0,90	29	10,73	2
20.00	0,75	0,90	24	9,50	2
21.00	0,75	0,90	22	8,71	2
22.00	0,76	0,90	21	7,77	1

Menurut tabel 2 kebutuhan daya reaktif mengalami perubahan nilai berdasarkan kebutuhan beban sistem untuk memperbaiki faktor daya yang diinginkan (standart PLN). Diketahui pada jam 10.00 WIB dan 14.00 WIB memiliki kebutuhan beban yang sama sebesar 20 MW tetapi memiliki faktor daya (sebelum diperbaiki) yang berbeda. Pada jam 14.00 WIB memiliki faktor

daya (sebelum diperbaiki) lebih besar sebesar 0.80 dibandingkan pada jam 10.00 WIB sebesar 0,78. Kebutuhan daya reaktif lebih besar pada jam 10.00 WIB sebesar 6,36 MVar dibandingkan jam 14.00 WIB sebesar 5,30 MVar. Jadi semakin besar faktor daya maka daya reaktif yang dibutuhkan semakin sedikit. Diketahui pada Jam 16.00 WIB dan 20.00 WIB memiliki faktor daya (sebelum diperbaiki) yang sama sebesar 0,75 tetapi memiliki kebutuhan beban yang berbeda. Pada Jam 20.00 WIB memiliki kebutuhan daya lebih besar sebesar 24 MW dibandingkan pada Jam 16.00 WIB sebesar 22 MW. Kebutuhan daya reaktif lebih besar pada jam 20.00 WIB sebesar 9,50 MVar dibandingkan jam 16.00 WIB sebesar 8,71 MVar. Jadi semakin besar beban yang dibutuhkan maka daya reaktif yang dibutuhkan semakin besar.

### 3.2 Nilai Induktansi Pada Rangkaian Kapasitor Bank di Gardu Induk Sragen

Menurut gambar 2 dapat ditentukan nilai induktansinya. Kabel sumber ke bus menggunakan kabel ACSR 550 mm<sup>2</sup> dengan nilai induktansi sebesar  $0,526 \times 10^{-3} \mu\text{H/m}$ . Panjang ( $\ell_s$ ) antara bus dengan sumber sebesar 70 m. Panjang ( $\ell_{s-s}$ ) antara *switch* pada kapasitor bank 1 dengan *switch* pada kapasitor bank 2 sebesar 4,1 m. Panjang ( $\ell_{s-c}$ ) antara *switch* dengan kapasitor bank sebesar 2,5 m. Jadi dapat ditentukan besar nilai induktansi pada rangkaiannya:

$$\begin{aligned} L_{s-c} &= \ell_s \times L_t \dots\dots\dots(2) \\ &= 70 \text{ m} \times 0,526 \times 10^{-3} \mu\text{H} = 0,036 \mu\text{H} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_B &= \ell_{s-s} \times L_{\text{bus}} \dots\dots\dots(3) \\ &= 4,1 \text{ m} \times 0,86 \mu\text{H} = 3,52 \mu\text{H} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_1, L_2, L_3 &= \ell_{s-c} \times L_t + 10 \mu\text{H} \dots\dots\dots(4) \\ &= 2,5 \text{ m} \times 0,526 \times 10^{-3} \mu\text{H} + 10 \mu\text{H} = 10,001 \mu\text{H} \end{aligned}$$

Menurut IEEE nilai 10  $\mu\text{H}$  adalah induktansi rangkaian kapasitor bank untuk tegangan yang di atas 54 kV.

Dengan:

$L_{s-c}$  : Nilai induktansi sumber ke bus ( $\mu\text{H}$ )

$L_B$  : Nilai induktansi bus ( $\mu\text{H}$ )

$L_t$  : Nilai induktansi kabel ( $\mu\text{H}$ )

$L_1, L_2, L_3$  : Nilai induktansi antara *circuit breaker* dengan kapasitor bank ( $\mu\text{H}$ )

$\ell_s$  : Panjang antara bus dengan sumber (m)

$\ell_{s-s}$  : Panjang antara *switch* pada kapasitor bank 1 dengan *switch* pada kapasitor bank 2 (m)

$\ell_{s-c}$  : Panjang antara *switch* dengan kapasitor bank (m)

### 3.3 Nilai Arus *Inrush* dan Frekuensi Akibat *Switching* Kapasitor Bank

Kapasitas nilai total kapsitor bank di Gardu Induk Sragen adalah sebesar 25 MVar. Jadi dapat dihitung:

Arus dasar kapasitor ( $I_c$ ), arus kapasitor murni/ideal menggunakan  $\varphi$  sebesar  $90^\circ$ .

$$I_{\text{dasar}} = \frac{Q_c}{V_n \sin \varphi} \dots\dots\dots(5)$$

$$= \frac{25 \times 10^6 \text{ VAr}}{150 \times 10^3 \text{ V} \times \sin 90^\circ} = 95,84 \text{ A}$$

Langkah selanjutnya menghitung besar nilai arus *inrush* dan frekuensi kapasitor bank yang berjumlah 3 step yaitu dengan cara sebagai berikut:

1) Keadaan pertama (*isolated*), hanya kapasitor  $C_1$  yang aktif dapat dihitung arus *inrush*nya.

Ditentukan terlebih dahulu besar nilai induktansi equivalennya berdasarkan gambar 2 konfigurasi rangkaian.

$$L_{\text{eq1}} = L_1 + L_{B1} + L_{s-c} \dots\dots\dots(6)$$

$$= 10,001 \mu\text{H} + 3,52 \mu\text{H} + 0,036 \mu\text{H} = 13,557 \mu\text{H}$$

Menghitung arus hubung singkat sumber

$$I_{\text{SC}} = \frac{V}{\omega L_{\text{eq1}}} \dots\dots\dots(7)$$

$$= \frac{150 \times 10^3 \text{ V}}{314 \times 13,557 \times 10^{-6} \text{ H}} = 3.523.694,25 \text{ A}$$

Menghitung arus yang melalui kapasitor bank. Kapasitor bank yang ditanahkan faktor pengali 1,35

$$I_1 = 1,35 \times I_{\text{dasar}} \dots\dots\dots(8)$$

$$= 1,35 \times 95,84 \text{ A} = 129,384 \text{ A}$$

Menghitung besar nilai arus *inrush*

$$I_{i \text{ max}} = \sqrt{2} \sqrt{I_{\text{SC}} I_1} \dots\dots\dots(9)$$

$$= \sqrt{2} \sqrt{3.523.694,25 \text{ A} \times 129,384 \text{ A}} = 30.196 \text{ A}$$

Menghitung besar frekuensi maksimum

$$f_i = f_s \sqrt{\frac{I_{\text{SC}}}{I_1}} \dots\dots\dots(10)$$

$$= 50 \text{ Hz} \sqrt{\frac{3.523.694,25 \text{ A}}{129,384 \text{ A}}} = 8.251,1 \text{ Hz}$$

Menghitung tingkat perubahan arus *inrush*

$$\frac{di}{dt} = \frac{2\pi f_i I_{i \text{ max}}}{10^6} \dots\dots\dots(11)$$

$$= \frac{2 \times 3,14 \times 8.251 \text{ Hz} \times 30.196 \text{ A}}{10^6} = 1.564,66 \frac{\text{A}}{\mu\text{s}}$$

Dengan:

$f_s$  : Frekuensi daya (Hz)

$I_{\text{SC}}$  : Arus hubung singkat sumber (A, rms)

$I_1$  : Arus yang melalui kapasitor bank (A, rms)

$L_{eq}$  : Induktansi equivalen ( $\mu H$ )

- 2) Keadaan kedua ketika (*back to back*) kapasitor  $C_2$  kondisi bekerja dan  $C_1$  masih dalam kondisi bekerja, maka arus *inrush* dihitung:

Ditentukan terlebih dahulu besar nilai induktansi equivalennya berdasarkan gambar 2 konfigurasi rangkaian

$$L_{eq2} = \left( \frac{(L_1 + L_{B1})L_2}{(L_1 + L_{B1}) + L_2} \right) + L_{S-c} \dots \dots \dots (12)$$

$$= \left( \frac{(10,001\mu H + 3,52\mu H)10,001\mu H}{(10,001\mu H + 3,52\mu H) + 10,001\mu H} \right) + 0,036\mu H = 5,78\mu H$$

Dimana:  $I_1 = I_2 = 129,384\text{ A}$

Menghitung besar nilai arus *inrush* saat kondisi kedua

$$i_{i\text{ peak}} = 13.500 \times \sqrt{\frac{V_r I_1 I_2}{f_s L_{eq} (I_1 + I_2)}} \dots \dots \dots (13)$$

$$= 13.500 \times \sqrt{\frac{150 \times 10^3 \text{ V} (129,384 \text{ A} \times 129,384 \text{ A})}{50 \text{ Hz} \times 5,78 \mu H (129,384 \text{ A} + 129,384 \text{ A})}} = 2.473.787,23 \text{ A}$$

Menghitung nilai frekuensi saat kondisi kedua

$$f_i = 9,5 \sqrt{\frac{f_s V_r (I_1 + I_2)}{L_{eq} I_1 I_2}} = \dots \dots \dots (14)$$

$$= 9,5 \sqrt{\frac{50 \text{ Hz} \times 150 \times 10^3 \text{ V} (129,384 \text{ A} + 129,384 \text{ A})}{5,78 \mu H \times 129,384 \text{ A} \times 129,384 \text{ A}}} = 1.345,4 \text{ Hz}$$

Menghitung tingkat perubahan arus *inrush* terhadap waktu step 2 yaitu menggunakan persamaan (11)

$$\frac{di}{dt} = \frac{2\pi f_i I_i}{10^6} = \frac{2 \times 3,14 \times 1.345,4 \text{ Hz} \times 2.473.787,23 \text{ A}}{10^6} = 2.090,1 \frac{\text{A}}{\mu s}$$

Dengan:

$f_i$  : Frekuensi arus *inrush* (kHz)

$f_s$  : Frekuensi sistem (Hz)

$L_{eq}$  : Induktansi equivalen ( $\mu H$ )

$V_r$  : Tegangan (kV, rms)

$I_1, I_2$  : Arus kapasitor bank (A, rms)

$i_{i\text{ peak}}$ : Puncak arus *inrush* (A, rms)

Tabel 2. Hasil perhitungan arus *Inrush* dan frekuensi

C	$L_{eq}$ ( $\mu H$ )	$I_{sc}$ (A)	$I_i$ (A)	$f_i$ (kHz)	(A/ $\mu s$ )
$C_1$	13,55	$3.523 \times 10^3$	30.196	8.251	1.564,66

C <sub>2</sub>	5,78	-	2.473x10 <sup>3</sup>	1.345,4	2.090,1
C <sub>3</sub>		-			

Tabel 2 di atas menunjukkan hasil perhitungan arus *inrush* dan frekuensi yang terjadi di Gardu Induk Sragen setiap step kapasitor. Menurut publikasi IEC, arus *inrush* yang diperbolehkan adalah sebesar 100 kali arus rms kapasitor, apabila arus *inrush* melewati batas yang diperbolehkan terus menerus dapat menyebabkan kerusakan pada sistem.

Tabel 3. Nilai arus *inrush* maksimal yang diperbolehkan menurut IEC

C	Arus rms kapasitor (A)	Arus <i>inrush</i> maksimal (A)
C <sub>1</sub>	129,384	12.938
C <sub>2</sub>	258,768	25.876
C <sub>3</sub>		

Tabel 3 di atas menunjukkan batas arus *inrush* yang diperbolehkan di Gardu Induk Sragen. Besarnya nilai arus *inrush* di Gardu Induk Sragen saat kondisi pertama sebesar 30.196 A sedangkan batas yang diperbolehkan sebesar 12.938 A. Untuk kondisi kedua atau saat C<sub>2</sub> aktif dan C<sub>1</sub> masih aktif, arus *inrush*nya sebesar 2.473.787,23 A sedangkan arus *inrush* yang diperbolehkan untuk kondisi kedua sebesar 25.876 A. Karena nilai arus *inrush* tersebut melewati batas yang diperbolehkan maka diberikan reaktor untuk mereduksi arus *inrush*.

### 3.4 Menentukan Nilai Reaktor Untuk Mereduksi Arus *Inrush* Pada Kapasitor Bank

Menentukan nilai reaktor seri untuk mereduksi arus *inrush* di Gardu Induk Sragen harus sesuai dengan standart *international JIS-C-4092* yaitu batas ideal 6% dari reaktansi kapasitor yang dipasang.

Kapasitansi kapasitor

$$C = \frac{Q_c}{\omega V_n^2} \dots\dots\dots(15)$$

$$C = \frac{8,3 \times 10^6 \text{ VAR}}{314 \times 150.000^2 \text{ A}} = 11,7 \text{ } \mu\text{F} = X_c = \frac{1}{314 \times 11,7 \text{ } \mu\text{F}} = 27,219 \Omega$$

Jadi:

$$\frac{X_L}{X_c} \times 100\% = 6\% = \frac{X_L}{27,21 \Omega} \times 100\% = 6\% , X_L = 1,63 \Omega$$

$$X_L = 2\pi fL = 1,63 \Omega = 314 \times L = L = 51.910,8 \text{ } \mu\text{H}$$

Nilai induktansi reaktor seri : 51.910,8  $\mu$ H



### 3.5 Besar Nilai Arus *Inrush* dan Frekuensi Akibat *Switching* Kapasitor Bank Setelah penambahan reaktor seri

- 1) Keadaan pertama setelah penambahan reaktor seri, hanya kapasitor  $C_1$  yang bekerja maka arus *inrush* dihitung.

Ditentukan terlebih dahulu besar nilai induktansi equivalennya berdasarkan persamaan (6) tapi diberi tambahan reaktor seri

$$L_{eq1} = L_1 + L_{SR1} + L_{B1} + L_{s-c}$$

$$= 10,001 \mu H + 51.910,8 \mu H + 3,52 \mu H + 0,036 \mu H = 51.923,52 \mu H$$

Menghitung arus hubung singkat sumber setelah penambahan reaktor seri menggunakan persamaan (7)

$$I_{SC} = \frac{V}{\omega L_{eq1}} = \frac{150 \times 10^3 V}{314 \times 51.923 \times 10^{-6} H} = 9.200,29 A$$

Menghitung arus yang melalui kapasitor bank setelah penambahan reaktor seri menggunakan persamaan (8)

$$I_1 = 1,35 \times I_{dasar} = 1,35 \times 95,84 A = 129,384 A$$

Menghitung besar nilai arus *inrush* setelah penambahan reaktor seri menggunakan persamaan (9)

$$I_{i \max} = \sqrt{2} \sqrt{I_{SC} I_1} = \sqrt{2} \sqrt{9.200,29 A \times 129,384 A} = 1.542,9 A$$

Menghitung besar frekuensi maksimum setelah penambahan reaktor seri menggunakan persamaan (10)

$$f_i = f_s \sqrt{\frac{I_{SC}}{I_1}} = 50 Hz \sqrt{\frac{9.200,29 A}{129,384 A}} = 422,2 Hz$$

Menghitung tingkat perubahan arus *inrush* setelah penambahan reaktor seri menggunakan persamaan (11)

$$\frac{di}{dt} = \frac{2\pi f_i I_{i \max}}{10^6} = \frac{2 \times 3,14 \times 422,2 Hz \times 1542,9 A}{10^6} = 4,09 \frac{A}{\mu s}$$

- 2) Keadaan kedua setelah penambahan reaktor seri ketika (*back to back*) kapasitor  $C_2$  kondisi bekerja dan  $C_1$  masih dalam kondisi bekerja, maka arus *inrush* dihitung:

Ditentukan terlebih dahulu besar nilai induktansi equivalennya berdasarkan persamaan (12) tapi diberi tambahan reaktor seri

$$L_{eq2} = \left( \frac{(L_1 + L_{SR1} + L_{B1}) L_{SR2}}{(L_1 + L_{SR1} + L_{B1}) + L_{SR2}} \right) + L_{s-c} = \left( \frac{(10,001 \mu H + 51.910,8 \mu H + 3,52 \mu H) 51.910,8 \mu H}{(10,001 \mu H + 51.910,8 \mu H + 3,52 \mu H) + 51.910,8 \mu H} \right) + 0,036 \mu H$$

$$= 25.958 \mu H$$

$$\text{Dimana: } I_1 = I_2 = 129,384 A$$

Menghitung arus *inrush* saat kondisi kedua setelah penambahan reaktor seri menggunakan persamaan (13)

$$i_{i \text{ peak}} = 13500 \times \sqrt{\frac{V_r I_1 I_2}{f_s L_{eq} (I_1 + I_2)}} = 13500 \times \sqrt{\frac{150 \times 10^3 \text{ V} (129,384 \text{ A} \times 129,384 \text{ A})}{50 \times 25.958 \text{ } \mu\text{H} (129,384 \text{ A} + 129,384 \text{ A})}} = 36.897 \text{ A}$$

Menghitung nilai frekuensi maksimum saat kondisi kedua setelah penambahan reaktor seri menggunakan persamaan (14)

$$f_i = 9,5 \sqrt{\frac{f_s V_r (I_1 + I_2)}{L_{eq} I_1 I_2}} = 9,5 \sqrt{\frac{50 \times 150 \times 10^3 (129,384 \text{ A} + 129,384 \text{ A})}{25.958 \text{ } \mu\text{H} \times 129,384 \text{ A} \times 129,384 \text{ A}}} = 19,9 \text{ Hz}$$

Menghitung tingkat perubahan arus *inrush* terhadap waktu step 2 setelah penambahan reaktor seri menggunakan persamaan (11)

$$\frac{di}{dt} = \frac{2\pi f_i I_i}{10^6} = \frac{2 \times 3,14 \times 19,9 \text{ Hz} \times 36.897 \text{ A}}{10^6} = 4,61 \frac{\text{A}}{\mu\text{s}}$$

Tabel 4. Hasil perhitungan arus *inrush* dan frekuensi setelah penambahan reaktor seri

C	$L_{eq}$ ( $\mu\text{H}$ )	$I_{SC}$ (A)	$I_i$ (A)	$f_i$ (Hz)	(A/ $\mu\text{s}$ )
C <sub>1</sub>	51.923	9.200,29	1.542,9	422,2	4,09
C <sub>2</sub>	25.958	-	36.897	19,9	4,61
C <sub>3</sub>		-			

Berdasarkan tabel 4 hasil perhitungan arus *inrush* dan frekuensi setelah penambahan reaktor seri perubahan arus *inrush* saat kondisi pertama sesuai dengan batas yang ditentukan oleh standart IEC yaitu arus *inrush* tidak melebihi 100 kali arus rms, tetapi saat kondisi kedua tidak sesuai dengan standart IEC. Pada saat kondisi pertama setelah penambahan reaktor seri sebesar 1.542,9 A sedangkan batas arus *inrush* yang diperbolehkan sebesar 12.938 A. Untuk kondisi kedua setelah penambahan reaktor seri arus *inrush* sebesar 36.897 A sedangkan arus *inrush* yang diperbolehkan sebesar 25.876 A.

#### 4. PENUTUP

Berdasarkan perhitungan dan pembahasan tentang analisis arus *inrush* akibat switching kapasitor bank dapat disimpulkan bahwa:

- 1) Arus *inrush* di Gardu Induk Sragen melebihi batas yang ditentukan oleh standart IEC yaitu melebihi 100 kali arus rms.
- 2) Setelah penambahan reaktor seri arus *inrush* di Gardu Induk Sragen dapat diredam untuk kondisi yang pertama dengan batas yang ditentukan oleh standart IEC tetapi untuk kondisi kedua belum bisa diredam sesuai yang ditentukan oleh standart IEC.

- 3) Untuk meredam arus *inrush* saat kondisi kedua harus menggunakan penambahan reaktor seri lebih dari 6% tapi tidak sesuai dengan standart *international* JIS-C-4092.

## PERSANTUNAN

Alhamdulillah, dalam penulisan artikel publikasi ini penulis berterimakasih kepada semua pihak yang telah ikut membantu penulis saat proses pembuatan tugas akhir ini.

- 1) Penulis mengucapkan rasa syukur Alhamdulillah kepada Allah SWT yang telah memberikan banyak rahmat serta hidayah-Nya sehingga dalam mengerjakan tugas akhir ini penulis dapat menyelesaikannya dengan lancar. Shalawat serta salam semoga selalu tercurahkan kepada baginda Nabi Muhammad SAW yang selalu memberikan suri tauladan yang terbaik.
- 2) Terima kasih kepada bapak, ibu dan saudara-saudaraku yang senantiasa selalu memberikan banyak dukungan berupa doa, motivasi, dan materi kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan baik.
- 3) Bapak Agus Supardi, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang selalu memberikan motivasi, ilmu, dan bimbingan hingga proses tugas akhir ini selesai.
- 4) Dosen Jurusan Teknik Elektro yang telah memberikan banyak ilmu pengetahuan dalam bidang elektro sehingga penulis mendapat refesensi yang cukup.
- 5) Pihak APP Salatiga dan PT. PLN (Persero) Gardu Induk Sragen yang telah membantu dan memberikan data untuk menyelesaikan penelitian tugas akhir ini.
- 6) Terima kasih kepada teman-teman angkatan 2014 Teknik Elektro UMS khususnya C-Electrical Engineering dan teman kontrakan yang selalu memberikan banyak dukungan kepada penulis.

## Daftar Pustaka

- Chandra, Ashish 2014. *Capacitor Bank Designing for Power Factor Improvement*, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering.
- Chiesa, Nicola. 2010. *Power Transformer Modeling for Inrush Current Calculation* . Norwegian University of Science and Technology.
- J. C. Das, 2010. *Transients in Electrical Systems*. The McGraw-Hill Companies, Inc. ISBN: 978-0-07-162603-3.
- Marlar Thein. 2008. *Improvement of Power Factor for Industrial Plant with Automatic Capacitor Bank*. Electrical Power Engineering, Yangon Technological University, Yangon, Myanmar.
- Mohamad, 2014. *Analisis Arus Inrush Saat Switching Kapasitor Bank di Gardu Induk Manisrejo Madiun*. Malang, Universitas Brawijaya.

- Ramasamy Natarajan. 2005. *Power System Capacitors*. United States of America. Taylor and Francis Group.
- Steve M. Mills. 2005. *IEEE Application Guide for Capacitance Current Switching for AC High-Voltage Circuit Breakers*. New York: IEEE.